

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет робототехніки та штучного інтелекту
Кафедра автоматизації та безпілотних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ**

**AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL
PROCESS OF CARBON DIOXIDE PRODUCTION**

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВз - 41
Рещиковець Максим Олегович

(підпис)

Керівник: д.т.н., професор
Повстяной Олександр Юрійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Решетило О. М.

(підпис)

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *робототехніки та штучного інтелекту*

Кафедра *автоматизації та безпілотних систем*

Ступінь вищої освіти: *бакалавр*

Галузь знань: *15 Автоматизація та приладобудування*

Спеціальність: *151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

Освітня програма: *«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. Ю. Повстяной

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ *Решиковця Максима Олеговича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Автоматизована система керування технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю*

керівник роботи _____ *Повстяной Олександр Юрійович, д.т.н., професор*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від " *31* " *12* 2025 року N *307/01-04*

2. Строк подання студентом роботи _____ *1.06.2026 р.*

3. Вихідні дані до роботи _____ *технологічний процес отримання діоксиду вуглецю*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз об'єкта керування, Обґрунтування ФСА, Обґрунтування ТЗА, Обґрунтування та опис принципових електричних схем, Програмне забезпечення системи автоматизації, Дослідження динамічних характеристик котлоагрегатів. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 11 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 5</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 6</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 7</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Розділ 7</i>	<i>Повстяной О. Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		

7. Дата видачі завдання 31.12.2025 р**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів випускної кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Аналіз об'єкта керування</i>	<i>20.02.2026 р.</i>	
2	<i>Обґрунтування вибору функціональної схеми</i>	<i>10.03.2026 р.</i>	
3	<i>Обґрунтування вибору ТЗА</i>	<i>20.03.2026 р.</i>	
4	<i>Обґрунтування і опис принципових електричних схем</i>	<i>1.04.2026 р.</i>	
5	<i>Програмне забезпечення систем автоматизації</i>	<i>10.04.2026 р.</i>	
6	<i>Розрахункова частина</i>	<i>20.04.2026 р.</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>1.05.2026 р.</i>	
8	<i>Оформлення роботи</i>	<i>1.06.2026 р.</i>	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)Рещиковець М.О.
(прізвище та ініціали)Керівник роботи _____
(підпис)Повстяной О. Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Решиковець М. О. Автоматизована система керування технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Метою роботи є проектування системи автоматизації технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю і водяної пари за допомогою котлоагрегатів.

Практична новизна полягає у дистанційному керуванні, що надає можливість оперативному персоналу здійснювати запуск і зупинку парогенераторної установки, а також керування її механізмами з централізованого пункту управління, оснащеного відповідними засобами контролю та регулювання.

Обсяг пояснювальної записки становить 54 друкованих сторінок. Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи складає 11 слайдів презентації.

Ключові слова: діоксид вуглецю, технологічні параметри, керування, SCADA-система.

					А та БС - 015.00.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Решиковець				Автоматизована система керування технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Повстяной						4	
Н. контр.	Лапченко Ю.С					ЛНТУ, гр. АВз-41		
Затв.	Гуменюк Л.О.							

ANNOTATION

Reshchikovets M. Automated control system for the technological process of obtaining carbon dioxide. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Automation and computer-integrated technologies". Lutsk National Technical University, Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, eight chapters, conclusions, a list of used sources, and appendices.

The purpose of the work is to design an automation system for the technological process of obtaining carbon dioxide and water vapor using boiler units.

The practical novelty lies in the remote control, which allows operational personnel to start and stop the steam generator unit, as well as control its mechanisms from a centralized control point equipped with appropriate control and regulation means.

The volume of the explanatory note is 54 printed pages. The volume of the graphic part of the qualification work is 11 presentation slides.

Keywords: carbon dioxide, technological parameters, control, SCADA

					А та БС - 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The task of this diploma project is to design an automation system for the technological process of obtaining carbon dioxide and water vapor using boiler units at “Hels”.

An analysis of the technological processes of the specified facility was carried out and microprocessor automation tools were selected for their control.

A functional diagram of the automation system for automatic control and regulation of the main technological parameters, the system for automatic start-up and stop of boilers, as well as technological protection and signaling was developed.

The necessary drawings and calculations were developed for the implementation of the specified systems, in particular a special narrowing device for selecting a pressure drop for measuring gas flow.

A modeling of the level control system in the boiler drum was carried out. Measures for technogenic, environmental and fire safety, labor protection were provided, and a calculation of the technical and economic efficiency of this automation system was performed.

The qualification work contains 48 sheets of explanatory notes, 5 sheets format drawings.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	
1.1 Загальна характеристика технологічного процесу отримання диоксиду вуглецю.....	
1.2 Опис технологічного процесу отримання пари і димових газів за допомогою котлоагрегатів для технологічних потреб виробництва.....	
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТП, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФСА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ АСР	
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ПРОЕКТУ КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ PE-25-14 ГМ В SCADA-СИСТЕМІ „GENESIS 32”	
РОЗДІЛ 7. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	
РОЗДІЛ 8. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
ДОДАТКИ	

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Автоматизація являє собою комплекс технічних засобів і методів, що забезпечують виконання виробничих процесів без безпосередньої участі людини, але під її контролем. Впровадження автоматизації у виробництво сприяє підвищенню обсягів випуску продукції, зниженню її собівартості, покращенню якісних показників, скороченню чисельності обслуговуючого персоналу, підвищенню надійності та довговічності обладнання, раціональному використанню матеріальних ресурсів, а також поліпшенню умов праці та рівня виробничої безпеки.

Застосування автоматизованих систем дозволяє звільнити людину від виконання функцій безпосереднього керування технологічним обладнанням. У таких системах функції персоналу зводяться до налагодження, регулювання, технічного обслуговування засобів автоматизації та контролю за їх функціонуванням. Ефективна експлуатація автоматизованих систем потребує високого рівня професійної підготовки обслуговуючого персоналу.

Залежно від функціонального призначення автоматичних пристроїв розрізняють такі основні види автоматизації:

- автоматичне вимірювання та контроль;
- сигналізація;
- керування;
- регулювання;
- захист.

Теплоенергетична галузь належить до найбільш автоматизованих сфер промисловості. Це зумовлено безперервним характером технологічних процесів, що відбуваються в теплоенергетичних установках. Виробництво теплової та електричної енергії повинно в кожний момент часу відповідати поточному рівню споживання. Більшість технологічних операцій у теплоенергетиці механізовані, а перехідні процеси характеризуються відносно

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високою швидкістю перебігу, що обумовлює необхідність широкого застосування засобів автоматизації.

Автоматизація технологічних процесів забезпечує низку суттєвих переваг, серед яких:

- підвищення продуктивності праці за рахунок скорочення чисельності обслуговуючого персоналу;
- зміна характеру праці персоналу від виконання ручних операцій до контролю та управління технологічними процесами;
- підвищення точності підтримання заданих параметрів;
- зростання рівня безпеки праці та надійності функціонування обладнання;
- підвищення економічності роботи енергетичних установок, зокрема парогенераторів.

Комплекс автоматизації парогенераторних установок включає системи автоматичного регулювання, дистанційного керування, технологічного захисту, теплотехнічного контролю, технологічних блокувань і сигналізації.

Системи автоматичного регулювання забезпечують безперервне та стабільне протікання основних технологічних процесів у парогенераторі, зокрема процесів живлення водою та горіння палива.

Метою кваліфікаційної роботи є проектування системи автоматизації технологічного процесу отримання диоксиду вуглецю і водяної пари за допомогою котлоагрегатів.

Завдання, які необхідно виконати для реалізації мети:

1. Провести аналіз технологічних процесів отримання диоксиду вуглецю і для їх керування підібрати мікропроцесорні засоби автоматизації.
2. Розробити системи автоматичного контролю та регулювання основних технологічних параметрів процесу отримання диоксиду вуглецю і водяної пари.
3. Розробити проекту процесу керування котлоагрегатом PE-25-14 ГМ в SCADA-системі „GENESIS 32”.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом роботи є системи автоматичного контролю та регулювання основних технологічних параметрів.

Предметом роботи є технологічний процес отримання диоксиду вуглецю.

Дистанційне керування надає можливість оперативному персоналу здійснювати запуск і зупинку парогенераторної установки, а також керування її механізмами з централізованого пункту управління, оснащеного відповідними засобами контролю та регулювання.

Теплотехнічний контроль роботи парогенератора та допоміжного обладнання здійснюється за допомогою автоматичних показувальних і реєструвальних приладів. Дані засоби забезпечують безперервний моніторинг параметрів технологічного процесу або підключаються до об'єкта контролю за потреби персоналом чи автоматизованими інформаційно-обчислювальними системами. Контрольно-вимірювальні прилади розміщуються на щитах і панелях керування з урахуванням вимог зручності спостереження та обслуговування.

Технологічні блокування забезпечують виконання операцій у визначеній послідовності під час пуску та зупинки обладнання, а також у разі спрацювання систем технологічного захисту. Їх застосування унеможлиблює виконання помилкових дій персоналом і гарантує безпечне відключення обладнання в умовах аварійних ситуацій.

Системи технологічної сигналізації призначені для інформування оперативного персоналу про поточний стан обладнання, попередження про наближення контрольованих параметрів до гранично допустимих значень та повідомлення про виникнення аварійних режимів роботи. Для цього використовуються світлові та звукові засоби сигналізації, які забезпечують своєчасне реагування персоналу на зміну умов експлуатації обладнання.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Загальна характеристика технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю

Виробництво діоксиду вуглецю переважно здійснюється як супутній процес утилізації димових газів під час виробництва теплової енергії або продуктів бродіння на спиртових підприємствах. Проте застосування таких технологій не забезпечує отримання кінцевого продукту найвищого ступеня чистоти. Саме тому продукція підприємства ВАТ «Хелс» залишається конкурентоспроможною навіть за умови її вартості, що перевищує середньоринковий рівень.

Технологічний процес виробництва діоксиду вуглецю базується на спалюванні природного газу в топках котлів. У результаті процесу горіння утворюються димові газы та теплова енергія у вигляді водяної пари. Питома витрата пари становить близько 4,3 кг на 1 кг виробленого діоксиду вуглецю. Вміст CO₂ у димових газах знаходиться в межах 8,2–9 %.

Продукти згорання з температурою до 300°C через газохід надходять до промивних скрубєрів, де відбувається їх охолодження до температури 40–60°C та очищення від механічних домішок. Скрубєр являє собою вертикальний циліндричний апарат, оснащений чотирнадцятьма розпилювальними форсунками. Вода подається через форсунки у вигляді дрібнодисперсного потоку, тоді як димові газы рухаються назустріч знизу вгору, що забезпечує ефективний тепло- та масообмін.

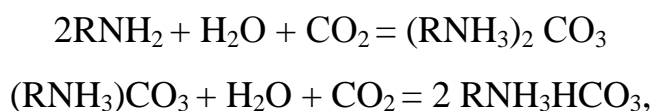
Після охолодження димові газы за допомогою екстаустера транспортуються до абсорбера, в якому здійснюється поглинання діоксиду вуглецю водним розчином моноетаноламіну (МЕА). Абсорбер виконаний у вигляді вертикального циліндричного апарата, заповненого насадкою з кілець

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рашига, що забезпечують розвинену поверхню контакту між газовою та рідкою фазами. Насадка безперервно зрошується робочим розчином моноетаноламіну.

Подача свіжого розчину МЕА до робочих баків трьох технологічних ліній здійснюється насосом зі сховища реагенту залежно від виробничої потреби. Заповнення кожного бака виконується окремо. Необхідність подачі свіжого розчину визначається на основі результатів лабораторних аналізів та даних щодо кількості робочого розчину в системі. Для контролю технологічного процесу передбачено систему світлової та звукової сигналізації, яка спрацьовує у разі перевищення допустимого рівня розчину в абсорбері.

Процес абсорбції діоксиду вуглецю моноетаноламіном відбувається відповідно до такої хімічної реакції:



Насичений діоксидом вуглецю розчин моноетаноламіну (МЕА) надходить до десорбера, попередньо проходячи через лужний теплообмінник, де здійснюється його попередній підігрів. Підвищення температури розчину сприяє інтенсифікації процесу десорбції та підготовці його до регенерації.

Виділення поглинутого діоксиду вуглецю з насиченого розчину МЕА здійснюється методом термічної десорбції, що полягає у розкладанні карбонатних сполук при підвищених температурах. Ефективність процесу визначається глибиною регенерації розчину: зі збільшенням ступеня розкладу зростає кількість вивільненого діоксиду вуглецю. Після завершення процесу десорбції регенований розчин проходить через лужний теплообмінник, де охолоджується до температури 80-100°C, а потім надходить до холодильника луку, в якому його температура знижується до 60-80°C. Охолоджений розчин збирається у спеціальному накопичувальному баку, звідки за допомогою насоса

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повторно подається до абсорбера для здійснення процесу поглинання діоксиду вуглецю з димових газів.

Десорбер являє собою вертикальний циліндричний апарат, верхня частина якого обладнана насадкою-дефлегматором. У верхній зоні дефлегматора на вході розчину встановлений розпилювальний пристрій, що забезпечує рівномірний розподіл рідини по поверхні насадки. Нижня частина апарата виконує функцію кип'ятильника, в якому здійснюється нагрівання та регенерація розчину.

Під час проходження через насадку десорбера розчин нагрівається за рахунок тепла висхідного потоку парогазової суміші до температури 110-120°C. Після цього він через зовнішні циркуляційні трубопроводи надходить до кип'ятильника десорбера під нижню трубну решітку, заповнює трубний простір на висоту 150-200 мм над верхньою трубною решіткою та далі спрямовується через труби до лужного теплообмінника.

Для забезпечення процесу регенерації в міжтрубний простір кип'ятильника подається водяна пара від парових котлів. У результаті теплообміну насичений розчин МЕА, який рухається трубним простором, нагрівається до температури 90-105°C, що забезпечує ефективне виділення поглинутого діоксиду вуглецю.

Виділений у процесі десорбції діоксид вуглецю після проходження газолужного теплообмінника та газового холодильника трубопроводами надходить до відстійника вологи. У відстійнику здійснюється видалення конденсату та механічних домішок із газового потоку. Після очищення діоксид вуглецю спрямовується до всмоктувального колектора компресорної станції, звідки компресорами стискається до тиску близько 8 МПа і подається на наповнення балонів або подальше зберігання та транспортування.

Таблиця 1.1 – Характеристика об'єкту

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Товарна продукція	Вуглекислий газ для заправки напоїв та промислового використання
Середньорічний випуск готової продукції, т	2300
Середньорічне споживання газу, тис. куб. м.	1600
Середньорічне споживання електроенергії, кВт год.	1700000
Технологія	Виробництво вуглекислого газу відбувається за рахунок спалювання природного газу в котлах типу ДКВР та ДЕ з наступним охолодженням та закачуванням в балони.
Енергоемність 1 тони продукції: - природний газ, тис. куб. м. - електроенергія, кВт год	0,7 740

Зріджений вуглекислий газ – диоксид вуглецю (CO_2), питома вага при 0°C і тиску 760 мм рт. ст. 1,977 кг/м³, при 20°C і 760 мм рт. ст. – 1,529 кг/м³, молекулярна вага 44, густина по відношенню до повітря 1,529. Об'єм 1 кг газу при 0°C і тиску 760 мм рт. ст. – 0,507 м³.

Диоксид вуглецю при тиску від 75,3 до 5,28 кгс/см² і температурах від +31,05 до $-56,6^\circ\text{C}$ переходить в рідкий стан.

При подальшому заморожуванні рідкий CO_2 перетворюється в сухий лід – прозору склоподібну тверду речовину з питомою вагою 1,3-1,6 кг/дм³.

Диоксид вуглецю використовується в промисловості при зварюванні металу та використовується як інертне середовище, в т. ч. як протипожежний засіб.

Таблиця 1.2 – Характеристики диоксиду вуглецю

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Товарна продукція	Норма по ДСТУ 8050-95		
	вищий сорт	1-ий сорт	2-ий сорт
Об'ємна частка діоксиду вуглецю (CO ₂), %, не менше	99,8	99,5	98,8

1.2. Опис технологічного процесу отримання пари і димових газів за допомогою котлоагрегатів для технологічних потреб виробництва

Для забезпечення технологічного процесу десорбції діоксиду вуглецю з водного розчину моноетаноламіну на підприємстві встановлено два парові котлоагрегати: ДКВР-2,5-13 та ДЕ-4-14ГМ продуктивністю 2,5 т/год і 4 т/год пари відповідно. Обидва котли працюють на спільний паровий колектор, забезпечуючи необхідні параметри теплоносія для технологічних потреб виробництва.

Паровий котел являє собою комплекс взаємопов'язаних агрегатів і теплообмінних пристроїв, призначених для виробництва водяної пари шляхом передачі теплової енергії від продуктів згоряння палива до води. Джерелом енергії, необхідної для здійснення процесу пароутворення, є паливо, хімічна енергія якого перетворюється на теплову в процесі горіння.

Функціонування котельної установки базується на трьох основних процесах: спалюванні палива, теплообміні між продуктами згоряння та робочим середовищем, а також пароутворенні, що включає нагрівання води до температури насичення, її випаровування та подальший перегрів утвореної пари за необхідності.

У процесі роботи котлоагрегату формуються два взаємопов'язані потоки: потік теплоносія, утворений продуктами згоряння палива, та потік робочого тіла, представленого водою і парою. Внаслідок теплообміну між цими потоками на виході котельної установки отримується пара із заданими параметрами тиску та температури.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з основних умов ефективної експлуатації котельного обладнання є забезпечення балансу між виробництвом та споживанням теплової енергії. Процеси пароутворення і передачі теплоти безпосередньо залежать від витрати робочого середовища та кількості теплоти, що надходить від спалювання палива.

Процес горіння палива являє собою складний фізико-хімічний процес окиснення горючих компонентів киснем повітря, який відбувається за певних температурних умов і супроводжується виділенням значної кількості теплоти. Економічність, стійкість та інтенсивність процесу горіння значною мірою визначаються якістю змішування палива з повітрям. Для газового палива швидкість хімічних реакцій є дуже високою, тому ефективність його спалювання переважно залежить від фізичних процесів сумішоутворення в пальникових пристроях.

Згідно з матеріальним балансом процесу горіння природного газу, для повного спалювання 1 м³ газу необхідно приблизно 10 м³ повітря. Відповідно співвідношення витрат газу і повітря становить близько 1:10 за умови сталості складу палива та температурних параметрів. Для забезпечення повноцінного змішування газ подається в повітряний потік через систему дрібних отворів малого діаметра, а повітря додатково турбулізується за допомогою спеціальних завихрювальних пристроїв.

Процес спалювання палива умовно поділяють на три основні стадії: запалювання, активне горіння та допалювання продуктів неповного згорання. Зазначені стадії переважно відбуваються послідовно, хоча окремі їх етапи можуть частково перекриватися в часі.

Теплова енергія, що виділяється під час горіння палива, передається воді через поверхні нагрівання котла. Процес теплообміну здійснюється через герметичні теплопровідні стінки труб, які формують поверхні нагрівання. Усередині труб циркулює вода або пароводяна суміш, тоді як зовнішня

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхня контактує з гарячими топковими газами та сприймає теплове випромінювання.

У котельних агрегатах реалізуються всі основні механізми теплопередачі: теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання. Залежно від переважного способу передачі теплоти поверхні нагрівання поділяються на конвективні та радіаційні. Інтенсивність теплообміну характеризується тепловою напругою поверхні нагрівання, яка визначається кількістю теплоти, переданої через одиницю площі за одиницю часу.

Ефективність процесу теплопередачі залежить від різниці температур між теплоносіями, швидкості їх руху відносно поверхні нагрівання та стану поверхонь теплообміну. Підтримання високої чистоти поверхонь нагрівання є важливою умовою забезпечення необхідної інтенсивності теплообміну та економічної роботи котлоагрегату.

Процес пароутворення в котлі відбувається поетапно. Початкове утворення пароводяної суміші розпочинається в екранних трубах під дією високих температур продуктів згоряння. Випаровування води є результатом переходу найбільш енергійних молекул із рідкого стану в газоподібний. Зі зростанням температури інтенсивність цього процесу збільшується, що сприяє підвищенню продуктивності котельної установки.

Зворотним процесом до пароутворення є конденсація, під час якої водяна пара переходить у рідкий стан з утворенням конденсату. Отриманий конденсат використовується в технологічних системах для охолодження окремих елементів обладнання, а також повертається в систему живлення котла, що сприяє підвищенню енергоефективності та зменшенню витрат підготовленої води.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Коефіцієнт корисної дії котла (η_m) визначається як відношення корисно використаної теплоти до розрахункової теплоти:

$$\eta_m = Q_1 / Q_p^p \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

де Q_1 - корисно використана теплота, віднесена до 1 нм^3 витраченого палива, $\text{кДж}/\text{нм}^3$;

Q_p^p - розрахункова кількість теплоти, віднесена до 1 нм^3 витраченого палива, $\text{кДж}/\text{нм}^3$.

Розрахункова теплота котла:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{вн} + Q_{фп} , \quad (\text{кДж}/\text{нм}^3), \quad (2.2)$$

де Q_n^p - нижча теплота згоряння природного газу, $\text{кДж}/\text{нм}^3$;

$Q_{вн}$ - фізична теплота, яка вноситься повітрям, $\text{кДж}/\text{нм}^3$;

$Q_{фп}$ - фізична теплота, яка вноситься паливом, $\text{кДж}/\text{нм}^3$.

Загалом рівняння теплового балансу при усталеному тепловому режимі роботи має вигляд:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 , \quad (\text{кДж}/\text{нм}^3), \quad (3.3)$$

де $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ - втрати теплоти відповідно на вироблення пари

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основною задачею, яку повинна вирішити автоматизація котлоагрегатів є забезпечення технологічного процесу виробництва CO₂ необхідними складовими, а саме - парою і димовими газами з певними параметрами.

Автоматизація котлоагрегатів передбачає наступні контури регулювання:

- регулювання тиску пари в паровому колекторі;
- регулювання розрідження в топках котлів;
- регулювання рівня в барабанах котлів;
- регулювання продувки;
- регулювання співвідношення витрат паливо/повітря (регулювання економічності спалювання палива).

Основні вхідні параметри котлоагрегату:

1. витрата палива; 4. витрата води на продувку;
2. витрата повітря; 5. витрата димових газів;
3. витрата живильної води; 6. витрата пари.

Основними вихідними параметрами котлоагрегату є:

1. тиск пари;
2. рівень води в барабані;
3. розрідження в топці котла;
4. концентрація димових газів;
5. концентрація солей в барабані.

Основними збурюючими параметрами є:

1. температура палива;
2. температура повітря;
3. калорійність палива.

Крім того, на параметри об'єкту керування буде впливати калорійність палива, відповідно до її зміни буде змінюватися співвідношення паливо-повітря

$F_{пал}$					$F_{пар}$
					0.00.000 ПЗ
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арк.

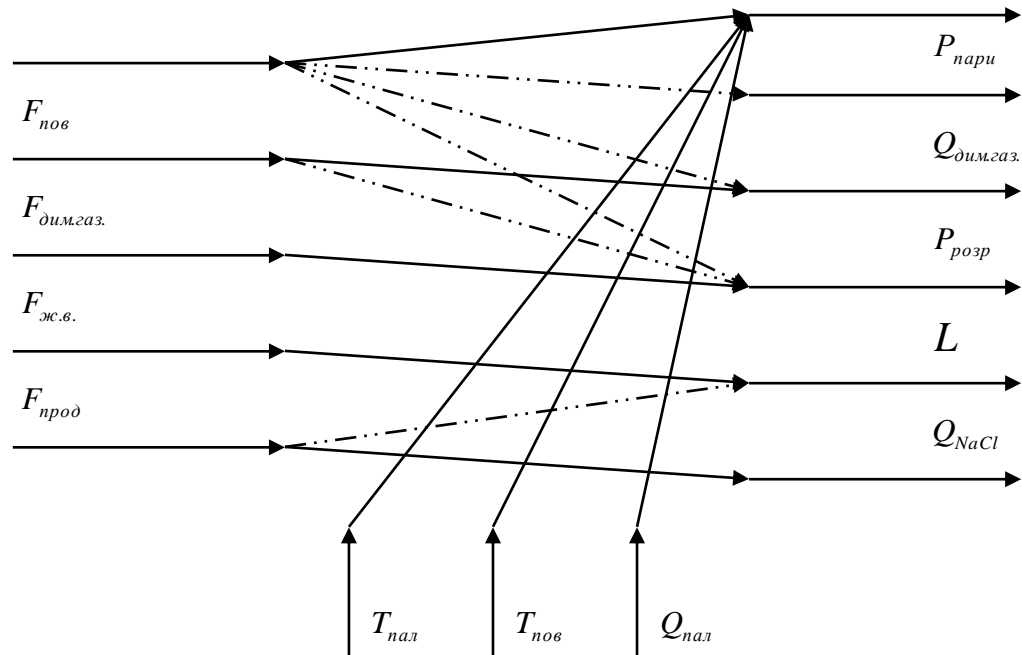


Рисунок 2.1 – Структурна схема взаємозв’язків технологічних параметрів об’єкта: $F_{пар}$ - витрата пари; $F_{палив}$ - витрата палива; $F_{пов}$ - витрата повітря; $F_{ж.в.}$ - витрата живильної води; $F_{дим.газ.}$ - витрата димових газів; $F_{прод}$ - витрата води на продувку; $P_{пар}$ - тиск пари; L - рівень води в барабані; $P_{розр}$ - розрідження в топці котла; $Q_{дим.газ.}$ - концентрація димових газів; Q_{NaCl} - концентрація солей в барабані; $T_{палив}$ - температура палива; $T_{пов}$ - температура повітря; $Q_{палив}$ - калорійність палива.

Із наведеної вище структурної схеми (рис.2.1) випливає, що котельна установка є складним динамічним об’єктом керування, який характеризується наявністю значної кількості взаємопов’язаних вхідних та вихідних параметрів. Схема також відображає напрями регулювання основних технологічних величин залежно від змін відповідних вхідних параметрів. Зокрема, розрідження в топці залежить від витрати димових газів; концентрація компонентів димових газів – від витрати повітря та палива; тиск пари на виході з котла – від витрати палива; рівень води в барабані — від витрати живильної води; концентрація солей у барабані – від витрати води під час продувки.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така структура взаємозв'язків дає змогу забезпечити стабілізацію регульованих параметрів за допомогою незалежних систем автоматичного регулювання, взаємодія яких здійснюється через об'єкт керування. Для контуру регулювання «витрата газу – тиск пари на виході» основними збурювальними чинниками є зміни температури палива, температури повітря, що подається на горіння, а також коливання теплоти згоряння (калорійності) палива.

У режимних картах котлів, наведених нижче, представлено значення регульованих технологічних параметрів залежно від рівня навантаження котлоагрегатів.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФСА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Функціональна схема автоматизації технологічного процесу є основним технічним документом, який визначає структуру, склад і принципи побудови систем автоматизації, а також склад засобів вимірювання, контролю та керування. На функціональній схемі в спрощеному вигляді відображаються технологічні агрегати, що підлягають автоматизації, засоби автоматизації та контрольно-вимірювальні прилади, які позначаються відповідно до чинних стандартів. Також на схемі показуються лінії зв'язку між окремими елементами системи.

Автоматизована система керування котлоагрегатами повинна забезпечувати підтримання технологічного процесу шляхом формування необхідних параметрів робочих середовищ. Зокрема, система має забезпечувати виробництво пари з тиском 6–7 атм та температурою 150–170 °С залежно від поточного навантаження технологічних ліній підприємства. Крім того, необхідно забезпечувати подачу димових газів із заданою витратою та концентрацією діоксиду вуглецю в межах 8–9 %.

Для забезпечення надійної, економічної та безпечної роботи котельної установки система автоматичного регулювання повинна виконувати такі функції:

1. Автоматичне регулювання технологічних параметрів:

- тиску пари у спільному паровому колекторі;
- розрідження в топках котлів;
- рівня води в барабанах котлів;
- процесу продувки барабанів;
- співвідношення витрат палива та повітря з метою забезпечення оптимального режиму спалювання і підвищення паливної економічності.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Контроль і вимірювання технологічних параметрів:

- тиску пари в паровому колекторі та барабанах котлів;
- розрідження в топках котлів;
- рівня води в барабанах котлів;
- концентрації компонентів димових газів на виході з котлів, зокрема вмісту CO₂ та O₂ ;
- температури димових газів до та після економайзера;
- температури живильної води до та після економайзера;
- тиску повітря перед пальниковими пристроями;
- тиску газу перед пальниками.

Реалізація зазначених функцій забезпечує стабільність технологічного процесу, підвищує ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів та сприяє безпечній експлуатації котлоагрегатів.

Регулювання тиску пари в паровому колекторі реалізується шляхом організації узгодженої роботи всіх котлоагрегатів, підключених до спільного парового колектора. У даному проєкті застосовано схему регулювання тиску пари зі стабілізацією теплового навантаження типу «завдання–тепло». Принцип її роботи полягає в тому, що до контролера кожного котлоагрегату надходять сигнали, які характеризують теплове навантаження котла, а саме: швидкість зміни тиску пари в барабані та витрата пари. Одночасно контролер отримує інформацію про поточний тиск у спільному паровому колекторі.

Використання зазначеної схеми дозволяє підвищити швидкодію системи автоматичного регулювання та скоротити тривалість перехідних процесів порівняно з традиційними схемами керування. Аналіз динамічних характеристик парогенераторів за каналами регулювання тиску пари та теплового навантаження при збуренні подачею палива показує, що канал теплового навантаження характеризується меншим транспортним запізненням і нижчою інерційністю. Зокрема, час запізнення становить близько 25 с, тоді як для каналу регулювання за тиском пари цей показник досягає 60 с. Крім того,

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зміна тиску в барабані відбувається з більшою швидкістю, що забезпечує оперативніше реагування системи на зміну режимів роботи котла.

З точки зору динаміки процесу, важливим параметром є не абсолютне значення теплового навантаження у певний момент часу, а його зміна, яка виникає внаслідок дії внутрішніх або зовнішніх збурювальних впливів. Саме величина зміни теплового навантаження є інформативним показником для оцінювання стану об'єкта керування та формування керуючих впливів у системі автоматичного регулювання.

Принципова схема вимірювання ΔD_q , яка далі називається сигналом „за теплом”, за допомогою звичайних вимірювальних засобів приводиться на рисунку 3.1.

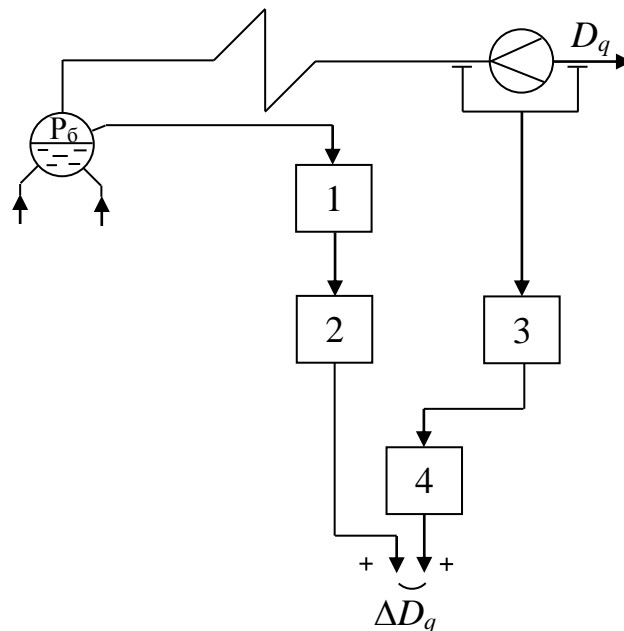


Рисунок 3.1 – Формування сигналу за теплом: 1 - давач тиску пари; 2 - диференціатор; 3 - давач витрати пари; 4 - вимірювальний блок

Регулювання живлення котлоагрегатів та підтримання тиску в барабані котла ґрунтується на забезпеченні матеріального балансу між витратою пари та подачею живильної води. Основним параметром, який характеризує цей баланс, є рівень води в барабані котла. Надійність та безпечність експлуатації

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

котлоагрегату значною мірою залежать від якості регулювання даного параметра. Зниження рівня води нижче допустимого значення може призвести до порушення природної циркуляції в екранних трубах, що, своєю чергою, викликає локальне перегрівання металу та його руйнування.

У зв'язку з цим до системи регулювання рівня води висуваються підвищені вимоги щодо точності та швидкодії. Важливим показником якості регулювання є також рівномірність подачі живильної води. Значні та часті коливання її витрати можуть спричинити виникнення термічних напружень у поверхнях нагріву економайзера, що негативно впливає на довговічність обладнання.

Барабанні котли з природною циркуляцією характеризуються значною акумулювальною здатністю, яка особливо проявляється під час перехідних режимів роботи. Якщо в усталеному режимі рівень води визначається співвідношенням між витратою пари та подачею живильної води, то в динамічних режимах на нього впливає низка збурювальних факторів. До основних з них належать зміни витрати живильної води, пароспоживання, паропродуктивності котла внаслідок зміни теплового навантаження, а також коливання температури живильної води.

Одним із найважливіших завдань автоматизації процесу спалювання палива є регулювання співвідношення витрат газу та повітря. Необхідність такого регулювання обумовлена як технологічними, так і економічними та екологічними чинниками. Процес горіння являє собою реакцію окиснення компонентів палива киснем, що надходить разом із повітрям. Для забезпечення повного та ефективного згоряння природного газу в топкову камеру необхідно подавати повітря у визначеному співвідношенні до витрати палива.

При недостатній кількості повітря відбувається неповне згоряння палива, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії котла, збільшення викидів шкідливих речовин та перевитрати палива. Надлишок повітря також є небажаним, оскільки викликає охолодження топкового простору, зменшує

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективність процесу горіння та сприяє утворенню оксидів азоту, які негативно впливають на навколишнє середовище.

Для забезпечення оптимального режиму спалювання палива в сучасних системах автоматизації застосовується трьохімпульсна схема регулювання співвідношення «газ–повітря». Така схема використовує сигнали витрати газу та повітря, а також здійснює корекцію за вмістом кисню в димових газах, що дозволяє підтримувати максимальну ефективність процесу горіння при різних навантаженнях котла.

Система автоматичного регулювання розрідження в топці призначена для підтримання заданого значення тяги та забезпечення стабільних умов горіння. Підтримання розрідження на рівні близько 3 мм вод. ст. запобігає виходу продуктів згоряння в приміщення котельні та забезпечує нормальну роботу пального пристроїв. Регулювання здійснюється шляхом зміни продуктивності димососа, що впливає на витрату димових газів через котел.

У живильній воді містяться розчинені солі та інші домішки, концентрація яких повинна відповідати встановленим нормативам. Під час процесу пароутворення домішки залишаються в котловій воді та поступово накопичуються. Частина солей утворює тверді відкладення та шлам, що осідають у нижніх частинах барабана і колекторів. Для запобігання надмірному накопиченню домішок застосовується система автоматичного регулювання продувки котла.

Величина продувки визначається на основі балансу домішок у парогенераторі та залежить від співвідношення концентрацій солей у живильній і котловій воді. Чим вища якість живильної води та більша допустима концентрація домішок у котловій воді, тим меншою є необхідна частка продувки. Ефективне керування продувкою дозволяє зменшити втрати тепла та води, забезпечуючи при цьому необхідну якість котлової води.

Для підвищення безпеки експлуатації котлоагрегатів передбачаються системи технологічної сигналізації та автоматичного захисту. Їх застосування

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обумовлене тим, що оператор не має можливості безперервно контролювати всі параметри роботи котла. У разі виникнення аварійних або передаварійних режимів система автоматично формує попереджувальні сигнали або здійснює аварійне відключення обладнання.

Зокрема, при зниженні рівня води в барабані нижче допустимого значення автоматичний захист запобігає перегріванню та руйнуванню поверхонь нагріву. Крім того, передбачається захист від згасання факела в топці, оскільки при зменшенні навантаження інтенсивність горіння може знизитися до критичного рівня. Своєчасне спрацювання систем захисту дозволяє уникнути пошкодження обладнання та забезпечити безпечну експлуатацію котельної установки.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Для побудови автоматизованої системи керування паровими котлами, що працюють на спільний паровий колектор, було обрано комплекс сучасних технічних засобів автоматизації. До складу системи входять прилади для вимірювання тиску та розрідження типу «Сапфір», місцеві манометри та вакуумметри, звужувальні пристрої (діафрагми) для вимірювання витрати середовищ, платинові термометри опору для контролю температури живильної води та димових газів, кулонометричні газоаналізатори для визначення концентрації кисню в димових газах, а також засоби контролю рівня води в барабані котла, виконані на базі диференціальних перетворювачів тиску типу «Сапфір-22ДД» та рівнемірного скла.

Для контролю якості котлової води використовується кондуктометричний давач солемісту. Функції відображення та реєстрації технологічних параметрів виконують вторинні прилади типу ІТМ-22. Для ручного керування передбачено блоки ручного управління БРУ-10 та зовнішні задавачі БРУ-7. Регулюючі впливи реалізуються за допомогою частотних перетворювачів, виконавчих механізмів типу МЕО та регулюючих органів. Центральним елементом системи керування є мікропроцесорні контролери Реміконт Р-130.

З урахуванням кількості вхідних та вихідних сигналів одного котлоагрегату (21 аналоговий вхід, 1 аналоговий вихід, 5 дискретних входів та 17 дискретних виходів) для реалізації системи автоматизації обрано такі модифікації контролерів:

- БК-21-15 (АІ – 8, АО – 2, ДІ – 8, ДО – 8) – 4 шт.;
- БК-21-14 (АІ – 8, АО – 2, ДІ – 4, ДО – 12) – 2 шт.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролер МІК-51 являє собою компактний багатофункціональний мікропроцесорний пристрій, призначений для автоматичного регулювання та логічного керування технологічними процесами. Його застосування є доцільним в енергетиці, хімічній, металургійній, харчовій та інших галузях промисловості. Завдяки модульній структурі та широким функціональним можливостям контролер забезпечує ефективне розв'язання як локальних, так і складних багатоконтурних задач автоматизації.

Сімейство контролерів МІК-51 включає три основні моделі:

- регулюючу модель БК-21;
- логічну модель БК-22;
- неперервно-дискретну модель БК-23.

У даній випускній роботі використано регулюючу модель БК-21, яка забезпечує реалізацію локальних, каскадних, програмних та супервізорних систем керування. Архітектура контролера дозволяє безударно здійснювати ввімкнення, вимкнення, перемикання та реконфігурацію контурів регулювання незалежно від їх складності. Крім функцій автоматичного регулювання, контролер підтримує виконання логічних операцій, обробку дискретних сигналів та формування аналогових, імпульсних і дискретних керуючих впливів.

Всі модифікації контролерів МІК-51 оснащені засобами оперативного керування, розміщеними на передній панелі. Це забезпечує можливість зміни режимів роботи, встановлення завдань, ручного керування виконавчими механізмами, контролю технологічних параметрів та індикації аварійних ситуацій.

Підключення стандартних аналогових та дискретних датчиків і виконавчих механізмів здійснюється за допомогою індивідуальних кабельних ліній зв'язку. У середині контролера всі сигнали обробляються в цифровому вигляді, що забезпечує високу точність та надійність функціонування системи.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролери МК-51 можуть об'єднуватися у локальну керуючу мережу «Транзит» кільцевої структури без використання додаткового мережевого обладнання. До складу однієї мережі може входити до 15 контролерів різних модифікацій. Обмін інформацією між вузлами здійснюється цифровими каналами зв'язку по витій парі. Через вбудований шлюз мережа може взаємодіяти із зовнішніми системами верхнього рівня через інтерфейси ІРПС або RS-232С.

Програмування контролера виконується шляхом конфігурування алгоритмічних блоків із бібліотеки стандартних алгоритмів, що зберігаються у постійній пам'яті пристрою. Такий підхід суттєво спрощує налаштування системи та не потребує розробки програмного коду. Вбудована акумуляторна батарея забезпечує збереження налаштувань при зникненні живлення, а конфігурація може бути додатково записана до постійного запам'ятовуючого пристрою.

До складу блоку контролера БК-21 входять:

- модуль контролю та програмування (МКП);
- процесорний модуль (ПРЦ);
- модуль стабілізованого живлення (МСН);
- акумуляторна батарея (БА);
- пульт настроювання ПН-1.

У межах даного проєкту розроблено фрагмент програмного забезпечення контролера МК-51 для реалізації двох основних контурів автоматичного регулювання:

1. регулювання паропродуктивності котла;
2. регулювання розрідження в топці котла.

Структурну схему програмної реалізації системи наведено на аркуші № 3 графічної частини проєкту, а принципову електричну схему зовнішніх підключень — на аркуші № 4.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На розробленій схемі блок контролера БК-21-15 забезпечує функціонування двох незалежних контурів автоматичного регулювання: контуру регулювання паропроductивності котла та контуру регулювання розрідження в топці. Це дозволяє підтримувати задані технологічні параметри, підвищувати ефективність роботи котельної установки та забезпечувати безпечну експлуатацію обладнання.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ АСР

Регулювання рівня в барабані котла здійснюється на основі матеріального балансу – кількість прибуваючої води рівна кількості виробленої пари.

Відхилення рівня в барабані характеризує наявність небалансу між припливом живильної води і витратою пари в пароводяній.

Матеріальний баланс:

$$F(\rho_v - \rho_n) \frac{dh}{dt} = D_n - D_{жв}$$

де F - площа дзеркала випаровування, м²;

ρ_v, ρ_n - густина води і пари, кг/м³;

D_n і $D_{жв}$ - витрата живильної води і пари, кг/с;

h - рівень води в барабані, мм.

Регулятор повинен при малих відхиленнях рівня забезпечує постійну різницю витрат живильної води і пари. Цю задачу виконує одноімпульсний ПІ-регулятор, принципова схема якого зображена на рисунку 5.1.

Регулятор 3 переміщує клапан 4 при появі сигналу про відхиленні рівня в барабані котла 1 від заданого значення, яке може змінюватися за допомогою давача ручного керування.

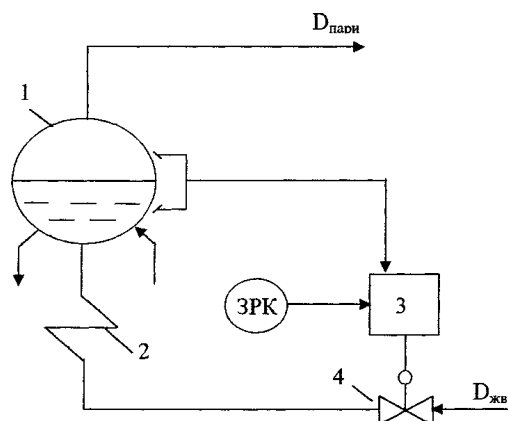


Рисунок 5.1 – Одноімпульсна САР рівня в барабанних парогенераторів

Ця схема отримала найбільше поширення на парових котлах невеликої паропродуктивності (до 10 т/год пари).

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основною вхідною величиною є витрата живильної води, вихідною - рівень в барабані котла. Збурюючою величиною є витрата пари (парове навантаження котла).

На рисунку 5.2 наведені експериментальна ('o') і апроксимована ('-') криві розгону ОР при 15% збуренні витратою живильної води.

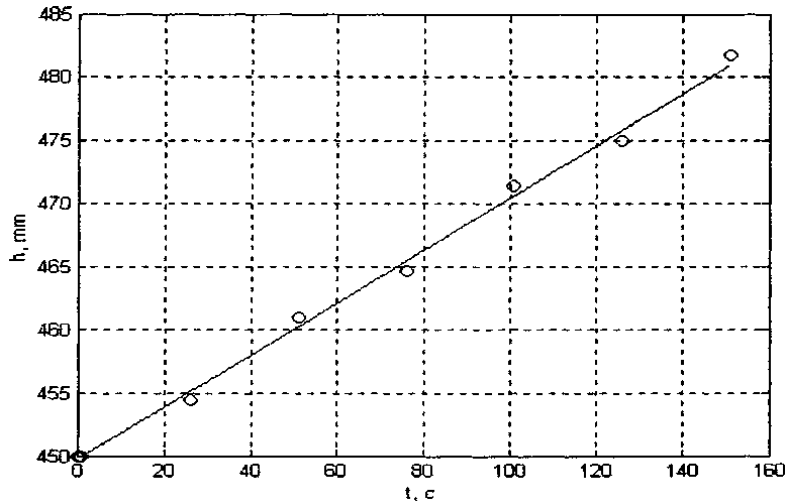


Рисунок 5.2 – Експериментальна ('o') і апроксимована ('-') криві розгону ОР при 15% збуренні витратою живильної води

При збільшенні витрати пари рівень у барабані спершу піднімається, а потім зміна рівня буде проходити у відповідності з рівнянням матеріального балансу. Це явище носить назву "набухання" рівня.

На рисунку 5.3 наведена експериментальна ('o') і апроксимована ('-') криві розгону ОР при 15% збуренні витратою пари.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

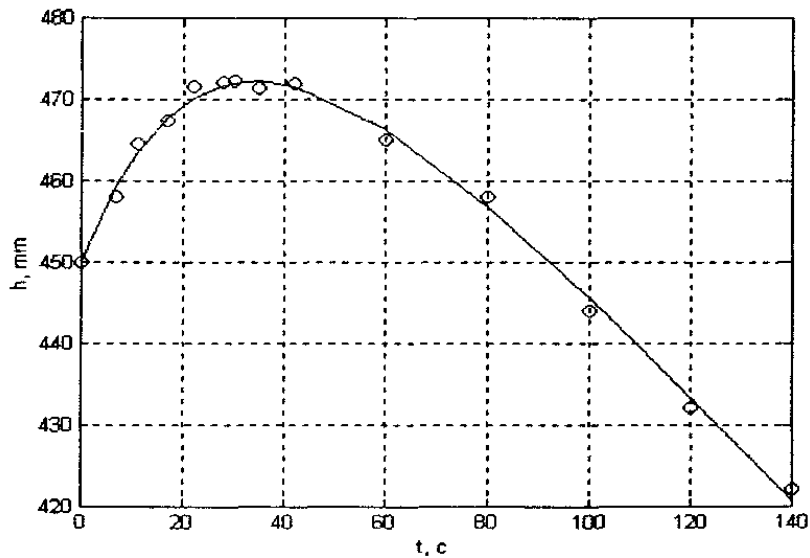


Рис. 6.3. Експериментальна ('o') і апроксимована ('-') криві розгону ОР при 15% збуренні витратою пари

В даному випадку оптимальні параметри настройки ПІ-регулятора будуть визначатися за інтегрально-квадратичним критерієм якості – програма знаходження настроювальних параметрів (рис.5.4).

*Область параметрів
оцінка настроювання ПІ-регулятора
($m=0.35$)*

*Інтегральна квадратична
якості J_2*

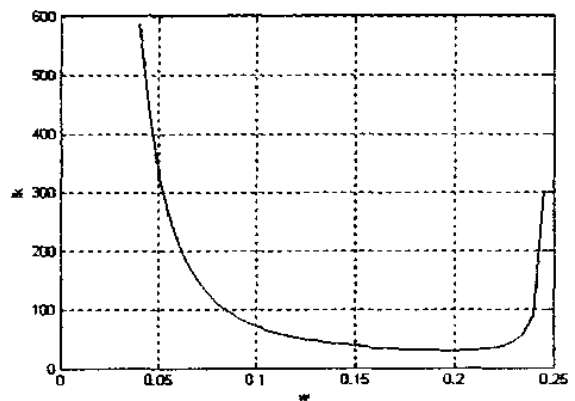
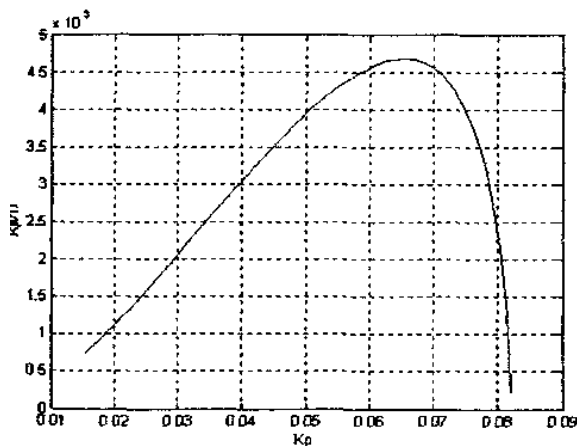


Рисунок 5.4 – Результати виконання програми

Знайдені параметри настроювання при $I_{k_{min}}=29.63$: $K_p=0.0751$;
 $K_p/T_i=0.0039$;

Змодельовано процес регулювання в Simulink, файл `strukt_mod.mdl`

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15% збурення витратою пари

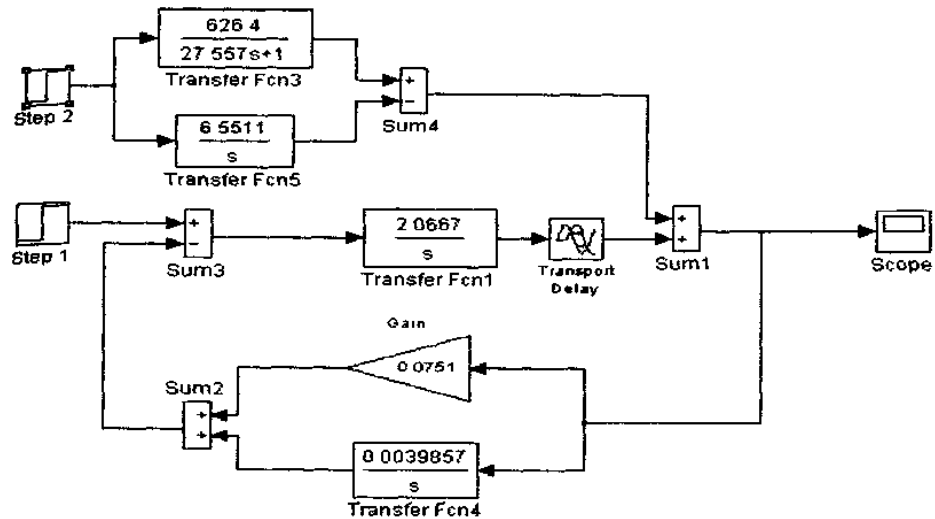


Рисунок 5.5 – Структурна схема САР рівня в барабані котла

Перехідний процес:

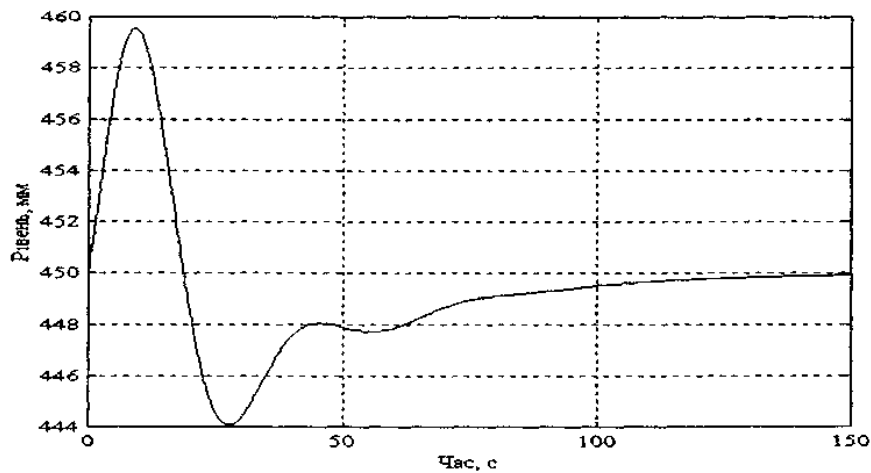


Рисунок 5.6 – Перехідний процес замкнутої системи при збуренні витратою пари і оптимальних настроювальних параметрах ПІ-регулятора

Даний перехідний процес задовольняє вимоги по якості регулювання, а саме - максимальне динамічне відхилення $A_1 = 15\text{мм}$ задовольняється умові ($A_1 = 9.7\text{ мм}$). Точність регулювання $\Delta = 2\text{ мм}$ задовольняється.

Час регулювання $t_p=70\text{ с}$ задовольняється ($t_p = 65\text{ с}$).

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6
РОЗРОБКА ПРОЕКТУ КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ
PE-25-14 ГМ В SCADA-СИСТЕМІ „GENESIS 32”

Виходячи з можливостей та наборів елементів технологічного процесу, які містять стандартні бібліотеки додатків, для створення програмного забезпечення автоматизованої системи управління котлоагрегатом PE-25-14 ГМ використовуємо продукт фірми Iconics SCADA-систему „Genesis 32”.

Genesis 32 призначена для створення оперативного диспетчерського керування верхнього рівня систем промислової автоматизації. Туди входять середовище розробки і виконання сценарних процедур VBA, що забезпечує можливість розробки частини програмного забезпечення засобами Microsoft Visual Basic for Applications 6.0.

Всі програмні компоненти реалізовані на базі багатопоточної моделі і підтримують технологію ActiveX.

Графічні мнемосхеми автоматизованих робочих місць оператора називаються екранними формами та розробляються за допомогою GraphWorX 32.

Екранні форми можуть містити в собі елементи перегляду графіків поточних і історичних даних TrendWorX 32, елементи перегляду подій і тривоги та елементи перегляду архіву подій AlarmWorX32 Reporter Active. Конфігурування зазначених елементів перегляду може виконуватися як у самому GraphWorX 32, так і в багатовіконних контейнерах TrendWorX 32 і AlarmWorX 32 відповідно.

Підсистема архівації даних реалізується на основі стандартних СУБД, а також серверу архівації даних TrendWorX 32 SQL Server і серверу архівації подій AlarmWorX 32 Logger.

Перегляд інформації з архіву TrendWorX32 SQL Server може виконуватися за допомогою елемента перегляду графіків TrendWorX 32 Viewer Active.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зображення конструктивних елементів даного процесу використовуємо конструктивно-технологічні елементи із набору бібліотеки, а нестандартні – створюємо самостійно.

Запуск технологічного процесу котлоагрегату PE–25–14 ГМ відбувається після натискання на кнопку СТАРТ, що знаходиться на панелі керування технологічним процесом. Зупинка технологічного процесу у випадку виникнення аварійних ситуацій може здійснюється після натиснення на кнопку СТОП, яка є залежною від кнопки СТАРТ.

Частота оновлення блоків стратегії становить 50, 100 і 150 мс.

Загальний вигляд панелі керування оператора в режимі розробки наведено на рисунку 6.1.

Процес утворення пари в котлоагрегаті здійснюється у визначеній технологічній послідовності. Пароутворення розпочинається вже в екранних трубах і відбувається за умов високих температур та тиску.

Подача повітря в топковий простір здійснюється за допомогою дуттєвого вентилятора, одночасно подається природний газ, який є основним паливом. У топці котла відбувається процес спалювання природного газу з виділенням теплової енергії. Усередині котлоагрегату розташовані димогарні труби, які з'єднані з топковою камерою через відбивну (поворотну) камеру.

Жарова труба в барабані котла встановлена зі зміщенням донизу та вбік, що забезпечує інтенсифікацію теплообміну та сприяє швидкому нагріванню води у вузькому кільцевому просторі між жаровою трубою та стінками котла. Таке конструктивне рішення також покращує умови природної циркуляції пароводяної суміші.

Димогарні труби з'єднані між собою у зоні повороту газового потоку за допомогою поворотної камери. Після передачі теплової енергії теплоносію димові гази надходять до поворотної камери, через яку спрямовуються у димохід.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У димохідному тракті встановлено економайзер, який забезпечує попередній підігрів живильної води за рахунок використання теплоти відхідних димових газів, що підвищує загальну енергоефективність котельної установки.

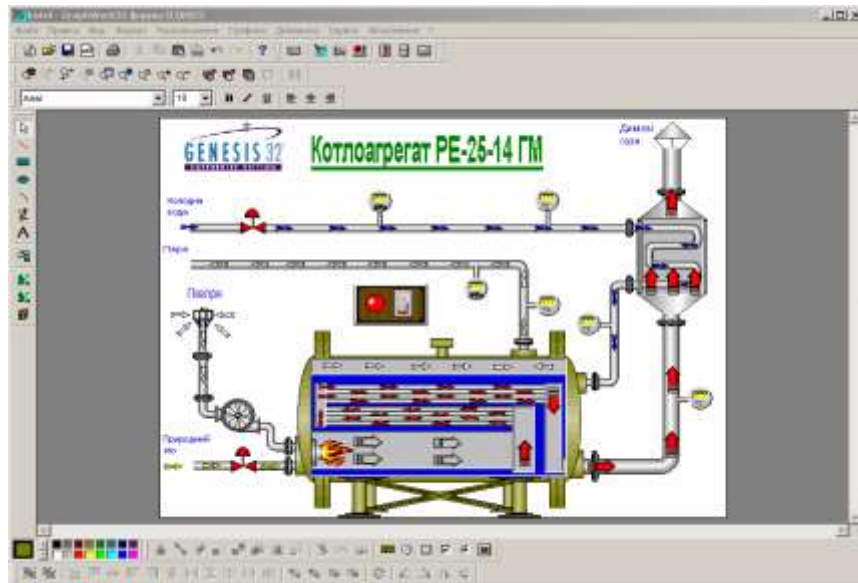


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд панелі керування технологічним процесом котлоагрегату PE–25–14 ГМ (SCADA-системи „Genesis 32”)

Стадії технологічного процесу котлоагрегату PE–25–14 ГМ показані на рисунках 6.2 – 6.5.

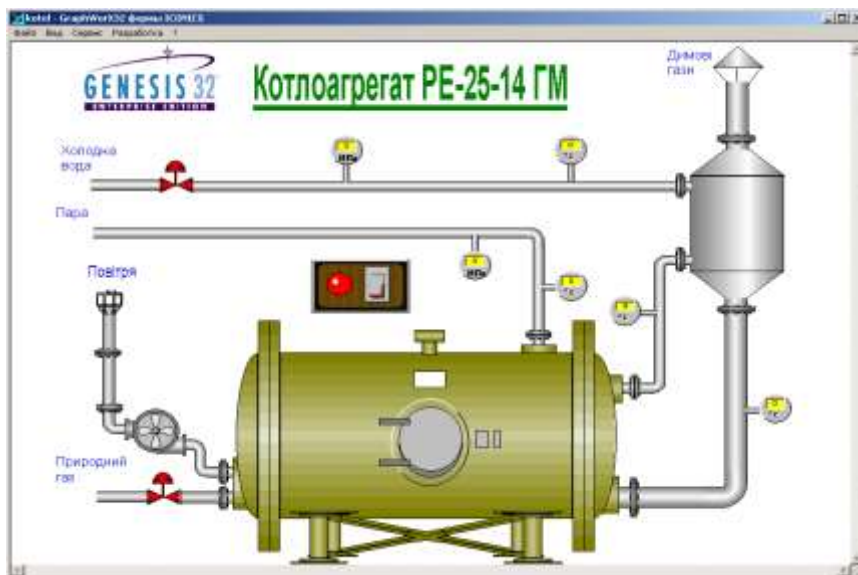


Рисунок 6.2 – Загальний вигляд панелі керування оператора в режимі Виконання (SCADA-система „Genesis 32”)

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

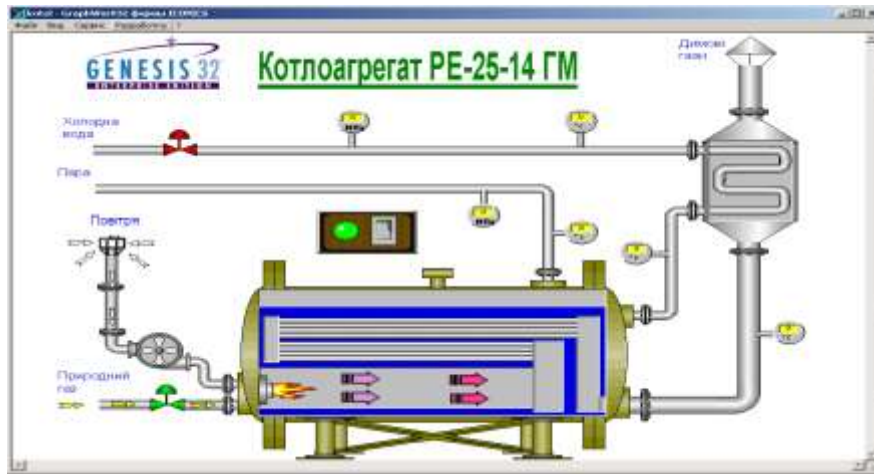


Рисунок 6.3 – Запалювання котлоагрегату

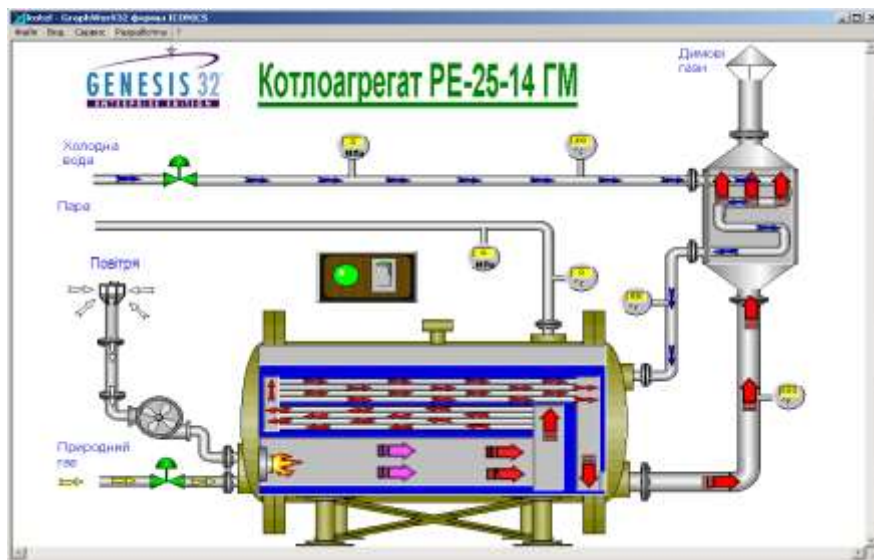


Рисунок 6.4 – Подача живильної води

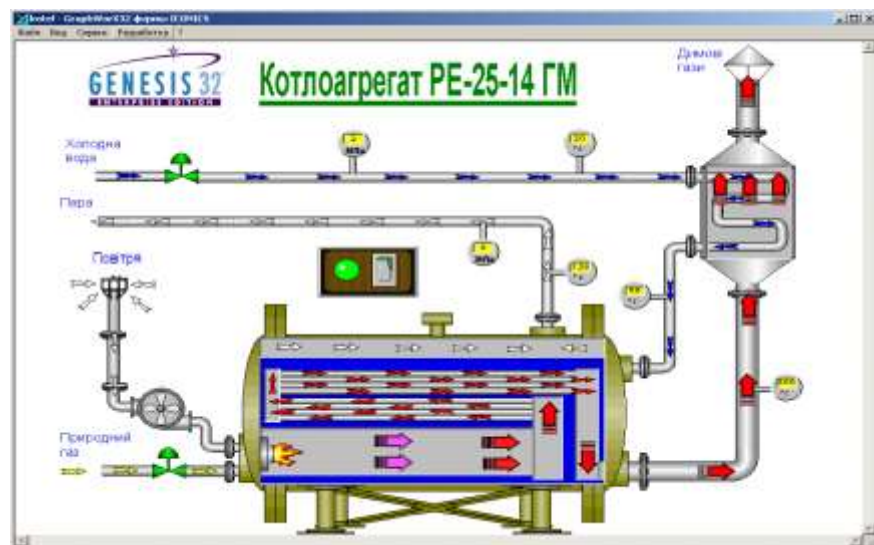


Рисунок 6.5 – Вихід системи на робочі параметри

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 7

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У нас передбачається здійснення контролю за роботою всіх автоматизованих об'єктів котельні з використанням щитів оперативного контролю та керування, які встановлюються безпосередньо поблизу котлоагрегатів ДКВР-2.5-13 та ДЕ-4-14.

До складу технічної документації на виготовлення щитів входять:

- загальний вигляд щита;
- специфікації засобів автоматизації, конструктивних елементів та матеріалів.

Проектні матеріали креслень загального вигляду щитів містять:

- конструктивне виконання щита;
- зображення внутрішніх поверхонь;
- технічні вимоги до виготовлення та монтажу;
- таблиці написів на табло та в рамках;
- таблиці електричних і трубних з'єднань та підключень;
- перелік складових частин;
- основний напис.

На фасадній панелі щита керування, габарити якого наведено на листі №6 графічної частини, розміщуються прилади керування, регулювання та індикації, блоки живлення типу БП22-36, а також сигнальні лампи. При компоюванні засобів автоматизації та електровимірювальних приладів необхідно враховувати їх функціональне призначення, кількість, розташування штуцерів і вводів, а також вимоги зручності монтажу та експлуатації. Розміщення апаратури здійснюється за функціональними групами відповідно до послідовності технологічного процесу.

На фасадній панелі щита керування передбачено розміщення таких елементів:

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- сигнальні табло з написами — 9 шт. та лампа індикації резервного живлення (на висоті 2000 мм);
- технологічні індикатори — 5 шт. (1650–1850 мм);
- контролери Реміконт Р-130 — 3 шт. та прилад контролю полум'я Ф34.2 (1400 мм);
- задавачі — 4 шт. (1150 мм);
- блоки ручного управління — 4 шт. (850 мм);
- малогабаритні перемикачі та кнопки скидання і перевірки сигналізації (750 мм);
- блоки живлення — 2 шт. (500 мм).

Під час компонування апаратури всередині щитів необхідно враховувати:

- допустимі габарити монтажних полів та спосіб встановлення;
- використання уніфікованих монтажних конструкцій (рейки, монтажні плити, поворотні рами);
- габарити виступаючих частин апаратури, встановленої на фасадних панелях;
- розташування введів, штуцерів, кабельних та трубних з'єднань;
- кількість вигинів і довжину трас електричних і трубних проводок;
- забезпечення нормативних проходів для обслуговування та дотримання вимог техніки безпеки.

Рекомендується розміщувати апаратуру переважно на бокових поверхнях щитів. У разі недостатності місця доцільно застосовувати поворотні рами, на яких встановлюються вимикачі, запобіжники, автоматичні вимикачі, випрямлячі, електромагнітні та пневматичні реле. Допустиме навантаження на поворотну раму не повинно перевищувати 30 кг. Встановлення апаратури, що потребує підключення трубних проводок, на поворотних рамах не допускається.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміщення обладнання на різних площинах щитів і стативів не повинно ускладнювати монтаж, демонтаж та експлуатаційне обслуговування, зокрема доступ до кришок, монтажних отворів та органів керування.

Кріплення плат і кронштейнів виконується на двох суміжних монтажних рейках. Для важких елементів (трансформаторів, стабілізаторів) передбачаються окремі кронштейни, закріплені на каркасі щита. При монтажі глибоких приладів (понад 400 мм) необхідно передбачати додаткові опорні рейки.

Робоче положення приладів і апаратури повинно відповідати вимогам чинних стандартів та інструкцій.

У приміщеннях керування не допускається встановлення:

- приладів із безпосереднім підведенням горючих або вибухонебезпечних середовищ;
- датчиків та дренажних ліній у межах щитів і стативів.

Апаратури кіл електроживлення доцільно розміщувати окремо на спеціалізованих щитах живлення. Ввідні вимикачі та запобіжники встановлюються окремими групами.

У внутрішньому просторі щитів не рекомендується розміщувати магнітні пускачі, контактори, рубильники, автоматичні вимикачі та плавкі запобіжники, що належать до силових електроустановок (за винятком елементів керування виконавчими механізмами систем автоматичного регулювання).

Трубні проводки (являють собою систему труб, з'єднувальних елементів, запірної арматури, кріпильних деталей та допоміжних конструкцій, об'єднаних у єдиний комплекс. Залежно від функціонального призначення трубні проводки поділяються на:

1. імпульсні – для передачі вимірювальних сигналів від відбірних пристроїв до приладів;
2. командні – для передавання керуючих імпульсів між елементами системи автоматизації;

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. живильні – для подачі стисненого повітря, води та інших середовищ живлення;
4. зливні (викидні) – для відведення відпрацьованих середовищ, конденсату та продуктів очищення;
5. обігрівальні – для подачі та відведення теплоносія з метою підтримання температурного режиму;
6. допоміжні – для подачі інертних середовищ до імпульсних ліній та обладнання.

Трубні проводки можуть прокладатися у виробничих приміщеннях безпосередньо по будівельних конструкціях або у складі спеціальних трас (коробів, лотків, блоків). Для окремо встановлених приладів і датчиків трубні проводки відображаються на схемах зовнішніх з'єднань у повному обсязі із зазначенням запірної арматури (відсічної, продувної, дренажної тощо).

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 8 ОХОРОНА ПРАЦІ

8.1 Характеристика об'єкту проектування з точки зору техніки безпеки та охорони праці

Технічна експлуатація котелень характеризується значною трудомісткістю технологічних процесів та потребує залучення великої кількості обслуговуючого персоналу, включаючи інженерно-технічних працівників. До персоналу котельних установок, зокрема операторів, працівників КВПіА та техніків-лаборантів, висуваються підвищені вимоги щодо володіння методами регулювання технологічних процесів, знаннями в галузі паливовикористання, автоматизації котлоагрегатів, водопідготовки, а також правил техніки безпеки.

Особливістю експлуатації газифікованих котелень є низька інерційність процесів горіння палива, що зумовлює підвищені вимоги до надійності систем автоматичного регулювання, захисту та сигналізації, а також до стабільної роботи основного й допоміжного обладнання. Одним із ключових завдань безпечної експлуатації є забезпечення безперервної та стійкої роботи систем димовідведення та вентиляції.

Парові котли, що працюють на природному газі, належать до об'єктів підвищеної небезпеки. У разі аварійних ситуацій високі значення тиску та температури пари можуть становити значну загрозу для персоналу та обладнання. Порушення теплового режиму в топці та газоходах може призводити до виникнення хлопків або вибухів значної інтенсивності. Основними причинами аварій котлів можуть бути: втрата механічної міцності елементів котла внаслідок корозії; утворення накипу та локальний перегрів поверхонь нагріву; перевищення допустимого тиску; конструктивні недоліки; дефекти матеріалів і зварних з'єднань; порушення режимів експлуатації; несвоєчасне проведення технічних оглядів і ремонтів; несправності запірної та запобіжної арматури.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні заходи щодо запобігання аваріям спрямовані на суворе дотримання вимог технічної експлуатації котельного обладнання. Котли оснащуються контрольно-вимірювальними приладами (манометрами, термометрами), системами звукової та світлової сигналізації відхилень параметрів, запобіжними клапанами, автоматичними пристроями відключення подачі газу при порушенні режимів роботи, а також вибуховими запобіжними клапанами в топці та газоходах відповідно до вимог нормативної документації.

Перед введенням в експлуатацію та в процесі роботи котли підлягають обов'язковим періодичним технічним оглядам, які включають внутрішній огляд не рідше одного разу на чотири роки та гідравлічні випробування не рідше одного разу на вісім років. У разі площі виробничого приміщення понад 250 м² повинно бути передбачено щонайменше два евакуаційні виходи.

На стадії проєктування приміщення центрального пункту керування (ЦПК) передбачаються заходи, спрямовані на забезпечення пожежної безпеки, запобігання поширенню пожежі та застосування відповідних інженерних систем захисту.

З огляду на використання природного газу котельня відноситься до категорії Г за вибухопожежною та пожежною небезпекою, зі ступенем вогнестійкості II. Приміщення операторної (ЦПК) належить до категорії Д зі ступенем вогнестійкості III.

Приміщення газорозподільного пункту (ГРП) котельні відноситься до класу вибухонебезпечної зони В-1а. До цього класу належать зони, в яких за нормальних умов експлуатації вибухонебезпечні суміші газів або парів з повітрям не утворюються, а їх поява можлива лише внаслідок аварійних ситуацій або несправностей обладнання.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8.2 Заходи по техніці безпеки

До експлуатації котлоагрегатів допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли обов'язковий медичний огляд, навчання за відповідною програмою підготовки та мають посвідчення кваліфікаційної комісії, що підтверджує право на обслуговування котельного обладнання. При заступанні на зміну обслуговуючий персонал зобов'язаний ознайомитися із записами у змінному журналі, перевірити справність котлоагрегату та допоміжного обладнання, а також працездатність аварійного освітлення і систем сигналізації, призначених для оперативного виклику адміністрації.

Під час чергування оператора забороняється:

- відволікатися від виконання службових обов'язків, визначених інструкцією;
- залишати котел без нагляду до повного завершення процесу горіння та зниження тиску до атмосферного;
- експлуатувати котли з несправними або простроченими за терміном повірки манометрами;
- здійснювати роботу котла за наявності витоків у зварних з'єднаннях або інших елементах, що перебувають під тиском;
- допускати сторонніх осіб у котельню без дозволу адміністрації.

Приміщення котельні, а також обладнання та технологічні вузли повинні постійно утримуватися у справному технічному стані та належній санітарній чистоті.

Виконання внутрішніх робіт у котлі дозволяється лише після його охолодження до температури не вище 50-60 °С та обов'язкової попередньої вентиляції топки і газоходів. Після вентиляції необхідно здійснити контроль повітряного середовища у внутрішніх об'ємах котла шляхом аналізу на відсутність шкідливих і вибухонебезпечних домішок.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час виконання робіт усередині котла, на майданчиках та в газоходах повинно використовуватися переносне електроосвітлення напругою не вище 12 В. Використання відкритого вогню та джерел займання забороняється.

У разі простою всіх котлоагрегатів перед входом у приміщення котельні необхідно увімкнути витяжну вентиляцію та перевірити відсутність загазованості за допомогою газоаналізаторів або інших контрольних засобів. При виявленні ознак загазованості забороняється вмикання електрообладнання, освітлення у невибухознахищеному виконанні, а також проведення розпалювання котлів і використання відкритого полум'я. Вмикання освітлення та вентиляції дозволяється лише після підтвердження безпечного газового середовища.

Приміщення котельні повинно бути забезпечене вуглекислотними вогнегасниками. Відповідальна за безпечну експлуатацію особа зобов'язана здійснювати контроль їх технічного стану, своєчасне обслуговування, перевірку та перезарядку. Крім того, у зоні розташування котлоагрегатів повинні бути передбачені первинні засоби пожежогасіння (ящики з піском, брезент та інші засоби).

Підготовка котла до розпалювання включає перевірку заповнення системи водою, справності запірно-регулюючої арматури, наявності та працездатності манометрів і термометрів, а також перевірку насосного обладнання, дуттєвих вентиляторів і димососів. При роботі на газовому паливі додатково контролюється тиск газу перед пальниками та стан газопроводів і запірної арматури.

Розпалювання котла здійснюється після обов'язкової вентиляції топки та газоходів протягом 10–15 хвилин із використанням дуттєвого вентилятора та димососа. Після цього відкриваються необхідні засувки на вході та виході котла.

Парові котли належать до об'єктів підвищеної небезпеки, експлуатація яких регламентується чинними нормативними документами та правилами

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

котлонагляду. У процесі експлуатації здійснюється періодичний контроль обладнання, арматури та систем безпеки під наглядом відповідних інспекційних органів. Також проводиться перевірка знань персоналу щодо обслуговування газового обладнання, систем автоматики безпеки та дій у разі аварійних ситуацій.

Технічний огляд котлів поділяється на первинний (перед введенням в експлуатацію) та періодичний (у процесі експлуатації). Під час огляду перевіряється технічна документація, виконується внутрішній огляд котла та гідравлічні випробування, а також оцінюється стан арматури, засобів автоматизації та контрольно-вимірювальних приладів. Особлива увага приділяється стану обмурівки, газових перегородок та поверхонь нагріву. Найбільш небезпечними дефектами є тріщини в елементах колекторів, місцях розвальцьовки труб та штуцерних з'єднаннях.

Під час гідравлічних випробувань перевіряється також арматура котла, включаючи запірні пристрої, засувки та запобіжні клапани. У разі виявлення дефектів приймається рішення щодо подальшої експлуатації котла або обмеження його режимів роботи зі зниженням параметрів та скороченням міжоглядового періоду.

Невід'ємною складовою експлуатації котельних установок є впровадження комплексної автоматизації основного та допоміжного обладнання. Це забезпечує підтримання матеріального та енергетичного балансу, роботу обладнання з оптимальним ККД, мінімізацію витрат палива та зниження впливу на довкілля при дотриманні вимог безпеки.

8.3 Електробезпека

Система автоматизації виконується відповідно до затвердженої технологічної документації та вимог нормативного документа ПУЗ-97. Засоби автоматизації, що перебувають під напругою або можуть бути в будь-який

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

момент підключені до джерела живлення, розглядаються як діюче електрообладнання, на яке поширюються чинні правила техніки безпеки під час експлуатації.

Електрообладнання котельні є складовою частиною комплексу засобів автоматизації та підлягає обов'язковому заземленню відповідно до вимог ПУЗ-87 і чинних інструкцій з монтажу захисного заземлення систем автоматизації. Вказаним вимогам також повинні відповідати параметри електроізоляції, застосування низьковольтного живлення та методи електричного розділення мереж.

Захисне заземлення обов'язкове для металевих і струмопровідних частин електрообладнання, які внаслідок пошкодження ізоляції можуть опинитися під напругою та доступні для дотику персоналу. У приміщеннях підвищеної небезпеки, а також для зовнішніх електроустановок заземлення є обов'язковим у таких випадках: при номінальній напрузі змінного струму понад 36 В та постійного струму понад 110 В; при напрузі 500 В і вище — незалежно від умов експлуатації; а також у вибухонебезпечних середовищах — незалежно від рівня напруги.

Живлення апаратури керування, що встановлюється в щитах, допускається при напрузі не вище 440 В змінного або постійного струму. У разі використання напруги понад 250 В змінного або постійного струму струмоведучі частини апаратури та клемні з'єднання повинні бути захищені ізолювальними кожухами. Підвід живильних кабелів рекомендується здійснювати безпосередньо до ввідного вимикача. Індивідуальні кола живлення систем автоматизації, керування та сигналізації виконуються з підключенням до відповідних вимикачів і запобіжників, оминаючи клемні зборки щита.

Прокладання проводів у жгутах і коробах повинно виконуватися з дотриманням таких вимог:

- прокладання здійснюється горизонтально або вертикально за найкоротшими трасами з мінімальною кількістю вигинів і перетинів;

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- жгути та коробки не повинні перекривати доступ до контактних з'єднань, елементів кріплення приладів та апаратури;
- вони повинні надійно закріплюватися до несучих конструкцій і рівномірно розподілятися відносно клемних рядів;
- вертикальні жгути прокладаються всередині каркасних стійок.

Прокладання трубопроводів на промислових об'єктах може здійснюватися підземним способом у прохідних і непрохідних каналах, а також безканально — безпосередньо в ґрунті.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі:

1. Проведено аналіз технологічних процесів отримання диоксиду вуглецю і для їх керування підібрано мікропроцесорні засоби автоматизації.
2. Розроблено системи автоматичного контролю та регулювання основних технологічних параметрів процесу отримання диоксиду вуглецю і водяної пари.
3. Розроблено проекту процесу керування котлоагрегатом PE-25-14 ГМ в SCADA-системі „GENESIS 32”.
4. Передбачено заходи з охорони праці та електробезпеки.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузяєв І. М. Основи комп'ютерного моделювання технічних систем : монографія. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020. 392 с.
2. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences*. Vol. 10 (1), 2023. Pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
3. Povstyanoy O., Zabolotnyi O., Rud V., Kuzmov A., Herasymchuk H. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 1. 2020. Pp. 456-465. doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.
4. Решиковець М. О., Повстяной О. Ю. Автоматизація технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю та водяної пари за допомогою котлоагрегатів // "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології": Матеріали конференції "XIII Міжнародна науково-практична конференція" (м. Київ, 7 травня 2026 р.). С.85-87.
5. Merlet R. B., Pizzoccaro-Zilamy M.-A., Nijmeijer A., Winnubst L, Hybrid ceramic membranes for organic solvent nanofiltration: State-of-the-art and challenges. *Journal of Membrane Science*. Vol. 599. 2020. p. 117839. doi: 10.1016/j.memsci.2020.117839.
6. Кравченко І. В., Микитенко В. І., Тимчик Г. С. Комп'ютерне моделювання: системи і процеси : навч. посібн. Київ : Вид-во «Політехніка», 2022. 215 с.
7. Балик Н. Р. Вибрані питання комп'ютерного моделювання процесів і явищ: підручник. Тернопіль, 2022. 272 с.
8. 16. Кузяєв І. М. Основи комп'ютерного моделювання технічних систем: монографія. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020. 392 с.

					А та БС – 015.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		